

---

## ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

---

УДК 631.4

### НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЧЕРНОЗЕМАХ (МОЛЛИСОЛЯХ) ПОД ПОЛЕЗАЩИТНЫМИ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ В РОССИИ И США\*

© 2015 г. Ю. Г. Чендев<sup>1</sup>, Т. Д. Соэр<sup>2</sup>, А. Н. Геннадиев<sup>3</sup>, Л. Л. Новых<sup>1</sup>, А. Н. Петин<sup>1</sup>,  
В. И. Петина<sup>1</sup>, Е. А. Заздравных<sup>1</sup>, С. Л. Буррас<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Белгород, ул. Победы, 85  
e-mail: Chendev@bsu.edu.ru

<sup>2</sup>Национальная лаборатория сельского хозяйства и окружающей среды Департамента сельского хозяйства США  
(USDA National Laboratory for Agriculture and the Environment), USA, 2110 University Boulevard, Ames, IA 50011-3120  
e-mail: tom.sauer@ars.usda.gov

<sup>3</sup>Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы

<sup>4</sup>Университет штата Айова (Iowa State University), USA, Department of Agronomy,  
1126 Agronomy Hall, Ames, IA 50011-1010  
e-mail: lburras@iastate.edu

Поступила в редакцию 04.02.2014 г.

Полезные лесонасаждения, возникшие на месте луговых и лугово-степных ландшафтов в лесостепной зоне северных материков, являются аккумуляторами углерода и участвуют в формировании органического вещества почв. На территории Великих равнин США (штаты Северная Дакота, Южная Дакота, Небраска) и Среднерусской возвышенности России (Белгородская, Воронежская, Курская области) выявлена общая закономерность усиления гумусово-аккумулятивного процесса в осевых частях лесополос, что проявляется в пространственных трендах изменения запасов С орг в слое 0–30 см почв по направлению от пашен к центральным частям лесополос с увеличением показателя на 3.5–10 т/га на каждые 10 м. За 55 лет произрастания лесополос на черноземах европейской России средняя годовая скорость накопления в них запасов углерода органического вещества (слой 0–100 см) находилась в пределах 0.7–1.5 т/га. За 19-летний период произрастания искусственного лесонасаждения на участке Гурон (США) средняя ежегодная скорость накопления С орг в метровой толще почвы (Taplustoll (Haplustoll), почвенная серия Бонилла) составила 1.9 т/га.

**Ключевые слова:** агролесомелиорация, изменение климата, северные материков, лесостепь, органический углерод почв.

**DOI:** 10.7868/S0032180X15010037

## ВВЕДЕНИЕ

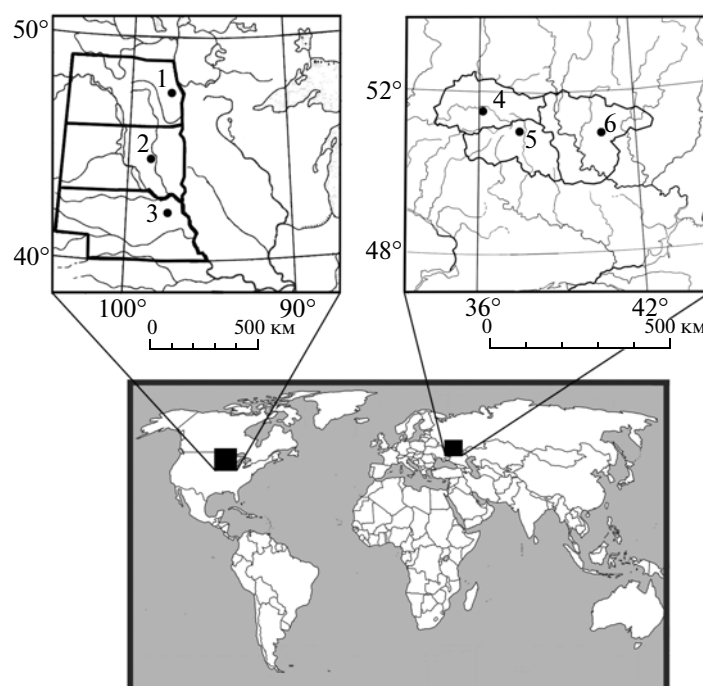
В современном почвоведении одним из наиболее актуальных направлений является исследование и оценка антропогенного преобразования почв. Комплексный характер этой проблемы, необходимость для ее корректного решения, сопоставления межрегиональных данных все чаще заставляют проводить эти исследования международными научными коллективами [4, 25, 27].

В широком спектре задач изучения техногенеза отдельное место занимают вопросы трансформации почв агролесомелиоративных ландшафтов. Многие аспекты, раскрывающие влияние полезных лесонасаждений на свойства

почв, достаточно хорошо изучены [3, 10, 14, 24, 26]. Однако существует и много нерешенных вопросов, один из которых — выяснение роли лесополос в продуцировании почвенного органического вещества [7, 8, 11, 12, 30, 31].

Как известно, начало научной разработки вопроса о значении для степных почв полезных лесонасаждений, о возможностях и методах облесения степей, положила докучаевская экспедиция 1891 г. В работах В.В. Докучаева впервые были сформулированы научные основы преобразования открытых степных ландшафтов в культурные лесоаграрные, и в этом преобразовании выявлена положительная роль древесной и кустарниковой растительности [11]. В XX в. российский опыт агролесомелиорации стал общепризнанным подходом к защите почв от ветровой и водной эрозии, примером чему служит почво-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов CRDF № RUG1-7024-BL-11, РФФИ № 11-05-92500-АФ-ГИР-Э\_а, РФФИ № 12-05-97512-р\_центр\_а.



**Рис. 1.** Ключевые участки исследования: 1 — Рейнольдс (штат Северная Дакота); 2 — Гурон (штат Южная Дакота); 3 — Норфолк (штат Небраска); 4 — Стрелецкая Степь (Курская обл.); 5 — Ямская Степь (Белгородская обл.); 6 — Каменная Степь (Воронежская обл.).

охранное лесоразведение на востоке Великих равнин США после катастрофических пыльных бурь, произошедших в 1930-х гг. [29, 33].

В работах многих авторов признается благоприятное влияние полейзащитных лесополос на почвы и окружающую среду в результате уменьшения интенсивности почвенной эрозии, а также за счет целого ряда других положительных эффектов: а) улучшения микроклимата вследствие снегозадержания зимой, уменьшения испарения и создания условий для накопления доступной для растений почвенной влаги весной и летом; б) увеличения урожайности сельскохозяйственных культур; в) формирования среды обитания диких животных и дикорастущих растений; г) улучшения эстетического восприятия ландшафта [1, 9, 23, 24, 26, 28].

В свете проблемы глобального изменения климата изучение экосистем полейзащитных лесополос приобретает новое звучание, так как в современных условиях они могут рассматриваться как объекты ассимиляции углерода из углекислого газа атмосферы за счет связывания его в фитомассе и почвенном органическом веществе. Этим вопросам посвящено достаточно много литературы, однако до сих пор существует определенный дефицит данных, касающийся полноты региональных характеристик и обоснования методических подходов.

В этой связи цель настоящей работы заключается в выявлении и анализе изменений в содержании органического углерода почв лугово-степных и луговых ландшафтов северных материков, для которых характерны пашенное земледелие и создание полейзащитных лесополос.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются лугово-степные черноземы лесостепи Среднерусской возвышенности и почвы прерий западной части “кукурузного пояса” США (северо-восток Великих равнин) под разными типами растительности — на целине, под сельскохозяйственными культурами и под растительностью лесополос.

Местоположение ключевых участков исследования показано на рис. 1.

При поиске ключевых участков авторы руководствовались следующими требованиями: участки должны находиться в лесостепной зоне северных материков; должны располагаться на ровных водораздельных поверхностях; на всех участках в непосредственной близости друг от друга, в пределах ареала одной естественной почвенной разности, на однородных почвообразующих породах должны находиться: угодье под целинной растительностью, пашня, лесополоса, возникшая на месте пашни или степной целины.

**Таблица 1.** Некоторые физико-географические показатели ключевых участков исследования

Орографическая структура	Название ключевого участка	Высота поверхности над ур. м., м	Почвообразующая порода	Почвы	Осадки, год, мм	Среднегодовая температура, °С	Гидротермический коэффициент
Среднерусская возвышенность (Россия)	Стрелецкая Степь	240	1	Черноземы выщелоченные	580	+5.3	1.23
	Ямская Степь	230	1	Черноземы типичные	530	+5.6	1.1
	Каменная Степь	190	2	Черноземы обыкновенные, переходные к типичным	480	+5.8	1.0
Великие равнины (США)	Норфолк	470	3	Гаплустоллы (Haplustolls), серия Турман (черноземы выщелоченные)	700	+9.6	1.47
	Рейнольдс	430	4	Арджиакволлы (Argiaquolls), серия Мустинка (лугово-черноземные почвы)	530	+4.4	1.41
	Гурон	440	5	Гаплустоллы (Haplustolls), серия Бонилла (черноземно-луговые почвы)	580	+7.7	1.31

Условные обозначения. Почвообразующие породы: 1 — карбонатные лёссовидные суглинки; 2 — карбонатные лёссовидные глины; 3 — легкие суглинки на флювиогляциальных супесях; 4 — маломощные карбонатные суглинки на флювиогляциальных гравийно-песчаных породах; 5 — карбонатные озерно-ледниковые валунные суглинки.

В качестве базовых в России нами были выбраны участки, расположенные в непосредственной близости от охраняемых зональных лугово-степных ландшафтов лесостепи: рядом с Центрально-Черноземным заповедником им. В.В. Алехина (участок Стрелецкая Степь, Курская обл.; 51°32' с.ш., 36°05' в.д.), вблизи и на территории заповедника “Белогорье” (участок Ямская степь, Белгородская обл.; 51°11' с.ш., 37°37' в.д.), на территории заказника Каменная Степь (участок Каменная Степь, Воронежская обл.; 51°02' с.ш., 40°44' в.д.). На территории США были выбраны участки Рейнольдс в штате Северная Дакота (47°42' с.ш., 97°11' з.д.), Гурон в штате Южная Дакота (44°16' с.ш., 98°15' з.д.), а также ключевой участок Норфолк в штате Небраска (42°03' с.ш., 97°22' з.д.) (названия участкам даны по ближайшим к ним населенным пунктам).

Для исследования подбирали участки, расположенные на хорошо дренированных водоразделах. На ряде ключевых участков реализация этого принципа оказалась непростой, так как в настоящее время для значительных территорий европейской России приобрела актуальность проблема вторичного гидроморфизма черноземов и их деградации под влиянием переувлажнения [5]. В частности, Хитровым и Чевердиным [18] в Каменной Степи отмечено увеличение числа ареалов сезонно-переувлажненных почв. В связи с этим потребовались консульта-

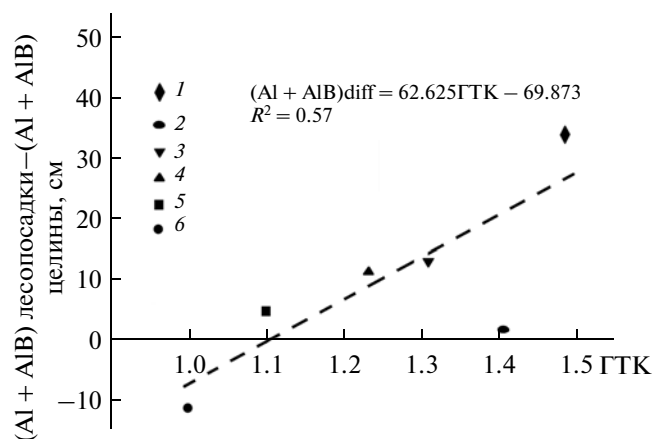
ции почвоведов, владеющих подробной информацией об особенностях почвенного покрова исследуемых участков.

В США на хорошо дренированном водоразделе располагался участок Норфолк. В то же время участки Рейнольдс и Гурон размещались на слабодренированных возвышенных территориях с неглубоким залеганием грунтовых вод.

Сведения о высоте поверхности над уровнем моря, почвообразующих породах, классификационном статусе изученных почв и некоторых климатических показателях на участках исследования приведены в табл. 1.

На ключевых участках распространены типичные для изучаемых районов способы ведения сельского хозяйства — с традиционными приемами агротехники и выращивания сельскохозяйственных культур.

В США исследованные пахотные почвы агролесомелиоративных ландшафтов находятся в фермерском землепользовании. Возраст их земледельческого освоения оценивается: на участке Норфолк — в 120 лет, на участке Рейнольдс — в 110 лет, на участке Гурон — в 21 год. Культуры севооборотов: на участке Рейнольдс — пшеница, кукуруза, соя, подсолнечник; на участке Гурон — кукуруза, соя, сорго; на участке Норфолк — кукуруза, соя, пшеница, люцерна.



**Рис. 2.** Зависимость между изменением мощности гумусового профиля почв под искусственными лесопосадками по сравнению с целинными аналогами и величиной гидротермического коэффициента (ГТК) на ключевых участках исследования. Участки: 1 – Норфолк (Небраска), 2 – Рейнольдс (Северная Дакота), 3 – Гурон (Южная Дакота), 4 – Стрелецкая Степь (Курская обл.), 5 – Ямская Степь (Белгородская обл.), 6 – Каменная Степь (Воронежская обл.).

Несмотря на проводимые фермерами США мероприятия по улучшению качества пахотных земель (главным образом, связанные с применением минеральных удобрений), для всех изученных пахотных почв Великих равнин существует проблема истощения их гумусового резерва.

Пахотные земли ключевых участков в России принадлежат сельскохозяйственным предприятиям (участки Ямская Степь и Каменная Степь) или находятся в фермерском пользовании (участок Стрелецкая Степь). Возраст освоения земель после перевода степной целины в пашню на всех рассматриваемых участках примерно одинаков и оценивается в 150 лет. На всех участках используются зернопропашные севообороты, причем в более прохладных и влажных условиях лесостепи (на участках Стрелецкая Степь и Ямская Степь) в севооборотах возрастает удельный вес кормовой и сахарной свеклы, а в более засушливых условиях лесостепи (на участке Каменная Степь) возрастает доля зерновых культур и подсолнечника. Система агротехники является традиционной для юга Центральной России и до последнего времени характеризовалась экстенсивным характером, одним из проявлений которого было недостаточное количество вносимых в почвы органических удобрений, не компенсировавших дегумификацию пахотных черноземов.

Лесопосадки на всех ключевых участках исследования в России и США имеют многорядный полезашитный характер и непродуваемые конструкции. Ширина изученных лесополос варьирует от 20 до 35 м. Лесополосы в России были созданы в середине – второй половине 1950-х гг. и

имеют возраст около 55 лет. Места их посадок были запроектированы на пашнях, возраст которых в момент закладки лесополос составлял около 95 лет. В составе древостоев лесополос присутствуют: на участке Стрелецкая Степь – тополь черный и береза бородавчатая; на участке Ямская Степь – клен американский, на участке Каменная Степь – дуб черешчатый и тополь бальзамический. Искусственные лесонасаждения, изученные в США, имеют разный возраст: на участке Норфолк – 70 лет, на участке Рейнольдс – 53 года, на участке Гурон – 19 лет. На участках Норфолк и Рейнольдс лесополосы были посажены на пашнях возраста 50 и 57 лет соответственно. На участке Гурон искусственное лесонасаждение не является лесополосой. Это сплошная многорядная посадка деревьев в форме прямоугольника площадью в несколько гектар. На юге данный участок граничит с пашней, а на западе – с луговой целиной, которая раньше была распространена на всей территории ключевого участка. Деревья на участке Гурон были посажены на двухлетней пашне после распашки целины. Учитывая, что на пашне за такой короткий срок не могло произойти заметных потерь органического вещества почв, авторы статьи сочли правомерным рассчитывать изменения гумусового статуса почв под лесопосадкой от их целинного состояния.

Древостои представлены: на участке Норфолк – топодем дельтовидным, вязом приземистым и шелковицей красной; на участке Рейнольдс – ясенем пенсильванским и можжевельником виргинским; на участке Гурон – ясенем зеленым, можжевельником виргинским и дубом крупноплодным.

Идентификация ключевых участков включала анализ разновременных карт, материалов дистанционного зондирования территории, консультации со специалистами в области географии, геоботаники, агролесомелиорации, а также рекогносцировочные выезды на предполагаемые участки полевого исследования. Принципиальным вопросом было установление исходной естественной однородности почвенного покрова в местах проведения исследований. Для этого предварительно использовали крупномасштабные почвенные карты (в России – масштаба 1 : 10000, в США – 1 : 20000) для попадания изучаемых на каждом участке угодий в одну и ту же почвенную разность – почвенную серию США (в соответствии с американской классификацией почв) и почвенный род в России (по традиционной отечественной классификации почв). Затем уточнение мест исследований проводили путем натурного ознакомления с почвами во время рекогносцировочных полевых выездов. Строго говоря, точной идентификации однородности почвенного покрова, по-видимому, можно добиться с помощью детальной почвенной съемки либо изу-

чая длинные почвенные траншеи. Авторам известны экспериментальные исследования по указанным методикам, которые выполнялись на территории Каменной Степи [15, 17, 19]. Вместе с тем, сравнительный анализ почвообразования на пашнях и под лесополосами также осуществляется путем профильного изучения почв в разрезах, закладываемых на каждом сравниваемом угодье [7, 8, 12].

Исследуемые участки характеризуются определенными различиями почвенного покрова, в связи с чем не могут рассматриваться в качестве единой выборки. Однако обнаружение общих тенденций изменения свойств почв (в частности, мощности гумусовых профилей, содержания и запасов органического углерода) под лесополосами по сравнению с пашней на разных участках позволяет предполагать определенную направленность воздействия лесополос на гумусовый профиль почв.

На всех ключевых участках полевые исследования проводили по единой методике. Вдоль трех равноудаленных друг от друга (на расстояние 5 м) линий профилирования с шагом отбора в 4–5 м осуществляли точечное опробывание наиболее гумусированного слоя 0–30 см почв (в каждой точке – в трехкратной повторности с последующим усреднением проб) так, чтобы общее количество точек на одной линии профиля было равным 14, из которых 6 – под лесонасаждением и по 4 – на смежных с двух сторон лесонасаждения угодьях. Таким образом, исходя из варьирования ширины лесополос (20–35 м), общая площадь опробывания под лесонасаждениями находилась в пределах 200–350 м<sup>2</sup> (полоса шириной 10 м), а пашен с двух сторон лесонасаждений – по 120–150 м<sup>2</sup> (также в виде полос шириной 10 м). Подобную методику почвенного опробывания и последующего статистического анализа результатов широко используют при изучении почв агролесомелиоративных ландшафтов на территории США [30, 32].

Кроме того, с помощью вспомогательных скважин и больших почвенных разрезов (с длиной боковых стенок 3 м и шириной передних стенок 1 м) на каждом угодье изучали морфометрические признаки почвенных профилей, а также осуществляли отбор почвенных проб. Разрезы закладывали в центральных частях лесополос и на полях с двух сторон лесополос – на краях зон почвенного опробывания, максимально удаленных от края лесополос. Расстояние между разрезами на пашнях и разрезами под лесополосами находилось в пределах 25–35 м.

Почвы целинных угодий изучали в больших разрезах и серии вспомогательных скважин.

Подобный подход, основанный на сравнительном изучении почвенных профилей и рас-

сматриваемых показателей, широко применяют в современном почвоведении [7, 12].

Отбор почвенных проб осуществляли для определения содержания углерода органического вещества почв (гумуса), а также плотности почвы. Пробоотбор для плотности почвы проводили с помощью стальных колец известного объема в почвенных разрезах и с помощью специального бура – в почвенных скважинах.

Содержание органического углерода (C<sub>орг</sub>) почв определяли методом сухого сжигания на анализаторе NA 15000 Fison (ThermoQuest Corp., Austin, TX) в Национальной лаборатории сельского хозяйства и окружающей среды Департамента сельского хозяйства США (г. Эймс, штат Айова).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важным морфогенетическим показателем, характеризующим направленность изменения во времени изучаемых почв в ряду целина–пашня–лесополоса, служит мощность их гумусовых профилей (суммарная мощность гор. A1 (A пах + A1) и A1B) (табл. 2).

На всех изученных участках мощность гумусовых профилей почв под лесонасаждениями оказалась достоверно больше таковых на прилегающих пашнях (в среднем на 15 см). В четырех случаях из шести (кроме участков Каменная Степь и Рейнольдс) установлено достоверное превышение мощности гумусовых профилей почв, формирующихся под искусственными лесопосадками, по сравнению с таковыми целинных почв (в среднем на 16 см).

Установленные различия можно связать с разуплотнением почв под лесопосадками в связи с разрыхляющей деятельностью корневых систем деревьев и более активной деятельностью землероев (главным образом, червей) по сравнению с почвами целинных угодий. Также весьма вероятным является активизация гумусово-аккумулятивного процесса в обстановке более прохладного микроклимата под лесопосадками по сравнению с целинным фоном и пашнями. Специфической особенностью почв, изученных на участке Рейнольдс, является наличие мелкокаменистого прослоя морены в нижней части гумусового профиля, который в целинных почвах фиксировался на глубине 38–56 см. Именно данный признак, по нашему мнению, тормозил прирост гумусово-аккумулятивной части профиля в почвах под лесополосой на рассматриваемом участке.

Зависимость между изменением мощности гумусового профиля почв, формирующихся под искусственными лесопосадками (по сравнению с целинными почвами), и гидротермическим коэффициентом на территории лесостепи Восточ-

**Таблица 2.** Статистические показатели мощности гумусовых горизонтов и гумусовых профилей (см) почв на ключевых участках исследования

Угодье	Горизонт	<i>n</i>	Lim	$\bar{X} \pm \delta_{\bar{X}}$	$\delta$	<i>V</i> , %
Рейнольдс, Северная Дакота						
Целина	A1	15	40–46	$42.8 \pm 0.5$	1.97	4.6
	A1 + A1B	15	46–55	$51.9 \pm 0.8$	2.95	5.7
Лесополоса	A1	15	32–42	$37.9 \pm 0.6$	2.43	6.4
	A1 + A1B	15	51–58	$53.6 \pm 0.5$	2.03	3.8
Пашня	A пах + A1	15	20–25	$22.8 \pm 0.3$	1.32	5.8
	A пах + A1 + A1B	15	20–25	$22.8 \pm 0.3$	1.32	5.8
Гурон, Южная Дакота						
Целина	A1	15	40–50	$44.3 \pm 0.7$	2.63	5.9
	A1 + A1B	15	40–50	$44.3 \pm 0.7$	2.63	5.9
Лесопосадка	A1	15	52–60	$56.1 \pm 0.6$	2.29	4.1
	A1 + A1B	15	52–60	$56.1 \pm 0.6$	2.29	4.1
Пашня	A пах + A1	15	29–34	$31.3 \pm 0.4$	1.50	4.8
	A пах + A1 + A1B	15	37–48	$40.6 \pm 0.8$	3.00	7.4
Норфолк, Небраска						
Целина	A1	15	18–30	$24.9 \pm 0.7$	2.83	11.4
	A1 + A1B	15	37–47	$40.9 \pm 0.8$	3.00	7.3
Лесополоса	A1	15	37–47	$42.1 \pm 0.8$	3.25	7.7
	A1 + A1B	15	64–80	$74.8 \pm 1.3$	4.87	6.5
Пашня	A пах + A1	30	35–49	$42.3 \pm 0.7$	4.00	9.5
	A пах + A1 + A1B	30	60–69	$63.6 \pm 0.5$	2.75	4.3
Стрелецкая Степь, Курская обл.						
Целина	A1	15	40–54	$44.7 \pm 0.9$	3.30	7.4
	A1 + A1B	15	60–77	$70.3 \pm 1.0$	3.87	5.5
Лесополоса	A1	15	35–50	$44.6 \pm 1.3$	5.19	11.6
	A1 + A1B	15	75–85	$81.4 \pm 1.0$	3.80	4.7
Пашня	A пах + A1	30	33–48	$37.3 \pm 0.6$	3.48	9.3
	A пах + A1 + A1B	30	47–80	$63.1 \pm 2.0$	10.83	17.2
Ямская Степь, Белгородская обл.						
Целина	A1	15	47–58	$52.9 \pm 0.9$	3.45	6.5
	A1 + A1B	15	69–80	$75.5 \pm 0.9$	3.36	4.5
Лесопосадка	A1	15	46–64	$60.1 \pm 1.9$	7.31	12.2
	A1 + A1B	15	71–92	$80.1 \pm 1.6$	6.29	7.9
Пашня	A пах + A1	30	39–56	$45.3 \pm 0.9$	4.65	10.3
	A пах + A1 + A1B	30	54–82	$69.2 \pm 1.3$	6.87	9.9
Каменная Степь, Воронежская обл.						
Целина	A1	15	41–55	$44.7 \pm 0.9$	3.56	8.0
	A1 + A1B	15	69–88	$75.5 \pm 1.3$	4.91	6.5
Лесополоса	A1	15	46–55	$49.6 \pm 0.8$	3.09	6.2
	A1 + A1B	15	57–70	$64.1 \pm 1.0$	3.80	5.9
Пашня	A пах + A1	30	37–47	$41.0 \pm 0.4$	2.37	5.8
	A пах + A1 + A1B	30	49–64	$58.5 \pm 0.6$	3.52	6.0

Примечание (здесь и в табл. 3 и 4): *n* – объем выборки; Lim – пределы варьирования;  $\bar{X}$  – среднее арифметическое;  $\delta_{\bar{X}}$  – ошибка среднего;  $\delta$  – среднее квадратическое отклонение; *V* – коэффициент вариации.

**Таблица 3.** Статистические показатели запасов органического углерода (т/га) в слое почвы 0–30 см на ключевых участках России и США

Угодье	<i>n</i>	Lim	$\bar{X} \pm \delta_{\bar{X}}$	$\delta$	<i>V</i> , %
Стрелецкая Степь					
Целина	6	119.9–135.4	$126.2 \pm 2.3$	5.55	4.4
Лесополоса	18	109.9–241.1	$126.4 \pm 7.0$	29.74	23.5
Пашня	24	91.5–126.7	$109.3 \pm 2.1$	10.24	9.4
Ямская Степь					
Целина	6	131.2–155.9	$138.0 \pm 3.9$	9.44	6.8
Лесополоса	18	119.3–163.2	$142.1 \pm 3.0$	12.81	9.0
Пашня	24	111.2–156.8	$127.2 \pm 2.4$	11.80	9.3
Каменная Степь					
Целина	6	135.9–170.0	$152.5 \pm 4.7$	11.40	7.5
Лесополоса	18	104.4–156.5	$125.0 \pm 3.3$	14.10	11.3
Пашня	24	100.0–140.7	$123.6 \pm 2.2$	10.98	8.9
Норфолк					
Целина	3	39.7–53.8	$45.7 \pm 4.2$	7.28	15.9
Лесополоса	18	29.7–51.2	$38.4 \pm 1.4$	6.00	15.6
Пашня	24	18.0–35.6	$23.9 \pm 0.8$	3.81	15.9
Рейнольдс					
Целина	12	95.7–110.3	$102.7 \pm 1.4$	4.76	4.6
Лесополоса	18	99.5–117.2	$107.3 \pm 1.2$	5.21	4.9
Пашня	12	75.5–101.8	$93.4 \pm 2.2$	7.69	8.2
Гурон					
Целина	3	44.6–48.4	$46.2 \pm 1.1$	1.96	4.2
Лесопосадка	24	51.0–83.3	$65.8 \pm 1.6$	7.90	12.0
Пашня	24	37.2–50.8	$43.8 \pm 0.7$	3.48	7.9

ной Европы и Великих Равнин США представлена на рис. 2.

Указанная зависимость имеет линейный характер. Из общей закономерности выпадает участок Рейнольдс. Однако на этом участке важным фактором, в значительной степени корректирующим прирост гумусового профиля в почвах лесопосадки, выступало наличие каменистого прослоя морены, о котором было сказано выше.

В соответствии с обнаруженным трендом можно предполагать, что приращение мощности гумусово-аккумулятивной части профиля в почвах лесостепной зоны под лесопосадками на каждые 10 см происходит при увеличении величины гидротермического коэффициента (ГТК) на 0.15. В пространстве лесостепи центра Восточной Европы это соответствует продвижению в северо-западном направлении на расстояние 50–100 (в среднем 75) км.

Установленная зависимость требует подтверждения результатами исследований на новых объектах. Вместе с тем обнаруженное линейное

соответствие между приращением мощности гумусово-аккумулятивной части профиля почв под лесопосадками и величиной ГТК уже само по себе заслуживает внимания.

По данным массовых опробований почв (слой 0–30 см) на большинстве ключевых участков установлены статистически значимые превышения запасов С орг в почвах под лесопосадками по сравнению с почвами прилегающих к ним пашен (табл. 3). Близкие к целинным или большие чем у целинных аналогов запасы С орг выявлены на участках Стрелецкая Степь, Ямская Степь, Рейнольдс, Гурон. Это служит дополнительным подтверждением активного протекания в почвах полезащитных лесонасаждений гумусово-аккумулятивного процесса.

Весьма закономерным, на наш взгляд, является обнаружение трендовых зависимостей изменения запасов С орг и объемной массы почв по направлению от центральных частей лесополос в сторону пашен (рис. 3, табл. 4).

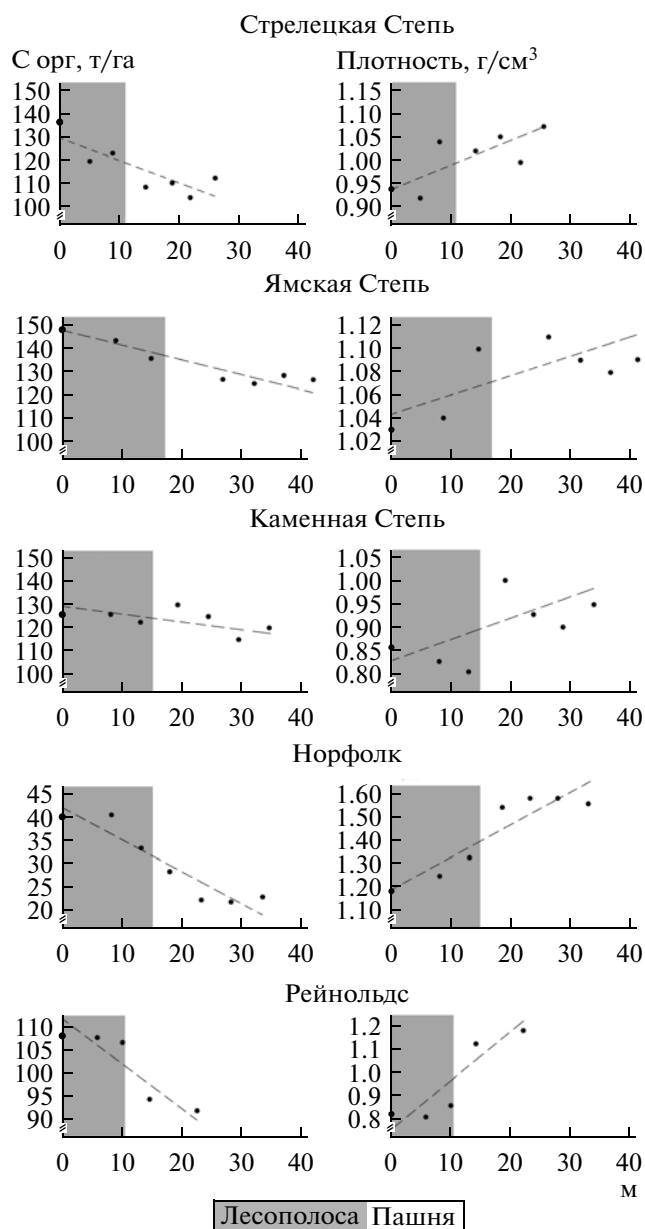


Рис. 3. Пространственные тренды изменения запасов С орг и плотности почвы в слое 0–30 см почв от центральных частей лесополос в сторону пашен. Отсчет расстояния взят от центра лесополос. Каждая точка на графиках — среднее из 6 опробований.

Найденные закономерности позволяют считать полезационные лесонасаждения геосистемами, имеющими внутреннюю структуру. В частности, из анализа рис. 3 и табл. 4 вытекает вывод о лучшей возможности продуцирования почвенного органического вещества в осевых (центральных) частях лесополос. Вероятно, в этих местах формируются наиболее благоприятные для гумусонакопления микроклиматические условия — более прохладные и влажные по сравнению с периферийными зонами лесополос. На изученных

нами ключевых участках градиент уменьшения запасов С орг в слое 0–30 см почв по направлению от центральных частей лесополос в сторону пашен варьирует от 3.5 (Каменная Степь) до 10 т/га (Стрелецкая Степь) на каждые 10 м при средней величине показателя на всех изученных участках — 7.3 т/га на 10 м.

Исследование распределения запасов С орг в почвенных профилях показало следующее.

На всех изученных ключевых участках в слое 0–50 см целинных почв в среднем содержится 74% от общих запасов углерода органического вещества метровой толщи почв (табл. 5).

В почвах, формирующихся под лесополосами, в большинстве случаев произошло перераспределение запасов органического вещества за счет пополнения гумусового резерва в нижнем полуметре данных почв; в слое 0–50 см относительная величина запасов углерода органического вещества уменьшилась в среднем до 68% от его запасов в метровой толще почв (табл. 5).

На пашнях рядом с лесопосадками также произошло уменьшение запасов гумуса в верхнем полуметре, в среднем до 70% относительно общих запасов в метровой толще, однако причины этого уменьшения здесь связаны с более интенсивной дегумификацией верхних почвенных слоев в результате выпашивания по сравнению с нижележащими слоями.

Обнаруженное перераспределение запасов углерода органического вещества в профилях почв лесополос нельзя объяснить только унаследованием их от пахотной стадии почвообразования, в которой находились почвы до момента создания лесонасаждений, поскольку рост относительных запасов органического углерода в нижнем полуметре почв под лесопосадками на участках Стрелецкая Степь, Ямская Степь, Каменная Степь и Гурон обнаруживается вместе с превышением в них абсолютных значений запасов органического вещества по сравнению с аналогичными слоями целинных почв (табл. 4).

Для реконструкции запасов С орг в изучаемых почвах до момента создания лесонасаждений необходимы сведения о закономерностях его поведения в результате длительной распашки автоморфных почв в изучаемых нами регионах. На территории Центральной лесостепи России данные исследования проводятся на протяжении многих лет и отражены в ряде публикаций [13, 21, 22]. Для территории северо-востока Великих равнин США авторам подобного рода исследования неизвестны. Поэтому в настоящее время указанные расчеты и реконструкции возможны лишь применительно к российским объектам исследования.

Агротехногенная эволюция запасов С орг черноземов, формирующихся на ровных водоразде-



**Таблица 4.** Запасы органического углерода (т/га) в центральных частях лесополос, на их краевых зонах, а также на сопредельных пашнях в 15 м от лесополос (слой почвы 0–30 см,  $\bar{X} \pm \delta_{\bar{X}}$ , для каждой точки  $n = 6$ )

Угодье	Стрелецкая Степь	Ямская Степь	Каменная Степь	Норфолк	Рейнольдс
Центр лесополосы	136.7 ± 2.1	147.4 ± 5.1	126.0 ± 7.6	26.7 ± 1.5	108.0 ± 2.5
Край лесополосы	122.6 ± 2.8	136.1 ± 3.2	122.5 ± 5.5	21.3 ± 1.3	106.7 ± 2.0
Пашня	113.0 ± 3.8	124.5 ± 3.5	121.1 ± 4.9	15.3 ± 0.8	92.2 ± 4.2

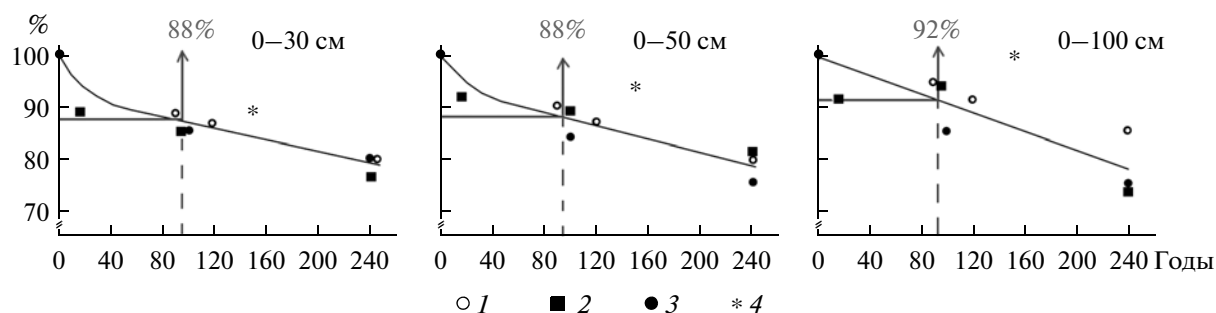
**Таблица 5.** Запасы углерода органического вещества в почвах целины, под лесополосами и на пашнях (т/га), на ключевых участках России и США (т/га — над чертой, % от запасов в слое 0–100 см — под чертой)

Слой, см	Ключевой участок					
	Стрелецкая Степь	Ямская Степь	Каменная Степь	Норфолк	Рейнольдс	Гурон
Целинные угодья						
0–50	175.0/72	208.2/66	227.9/67	61.7/79	182.4/81	66.7/78
50–100	68.5/28	105.7/34	113.6/33	16.5/21	42.5/19	19.2/22
0–100	243.5/100	313.9/100	341.5/100	78.2/100	224.9/100	85.9/100
Искусственные лесопосадки						
0–50	178.6/63	237.3/63	208.6/59	44.9/67	166.0/82	90.8/73
50–100	104.6/37	139.7/37	147.3/41	22.4/33	36.2/18	34.2/27
0–100	283.2/100	377.0/100	355.9/100	67.3/100	202.2/100	125.0/100
Пашни рядом с лесопосадками						
0–50	188.5/67	186.6/60	189.9/67	35.3/69	108.5/81	65.0/76
50–100	93.8/33	126.2/40	95.3/33	15.9/31	25.0/19	20.3/24
0–100	282.4/100	312.8/100	285.2/100	51.2/100	133.5/100	85.3/100

лах, была изучена нами ранее на территории лесостепи Среднерусской возвышенности на трех ключевых участках, климатические и почвенно-литологические условия которых, а также характер земледельческого освоения весьма близки к таковым участков Стрелецкая Степь, Ямская Степь и Каменная Степь. Изученные агрохроноряды черноземов находятся в Ивнянском (черноземы слабооподзоленные), Прохоровском (черноземы типичные) и Губкинском (черноземы типичные) р-нах Белгородской обл. В изученных агрохронорядах во времени происходила односторонняя де гумификация как пахотных горизонтов (слой 0–30 см), так и в целом почвенных профилей. Установлено, что изменение во времени запасов гумуса в слоях 0–30 и 0–50 см описывается экспонентами с высокой теснотой связей, несмотря на пространственную разобщенность данных участков, а в слое 0–100 см хорошо аппроксимируется линейными трендами [22]. На обобщенных по трем изученным агрохронорядам графиках потерь органического вещества, выраженных в процентах относительно целинных черноземов (рис. 4), стрелками и цифрами отмечены значения потерь органического вещества, соответствующих 95-летнему периоду распашки —

длительности существования агроценозов на участках Стрелецкой, Ямской и Каменной Степи до посадки на них лесополос (учитывался общий возраст распашки черноземов, сопряженных с лесополосами (150 лет) и возраст лесополос (55 лет)). Указанные значения относительных потерь гумуса были использованы для реконструкции запасов углерода органического вещества черноземов к моменту создания на них лесополос (табл. 6).

Наши исследования также показали, что использовать запасы органического вещества в почвах пашни рядом с лесополосами для подобных реконструкций неправомерно. Де гумификация в них под влиянием лесополос замедляется, что показывают усредненные запасы углерода органического вещества в 150-летних пахотных черноземах рядом с лесополосами; они оказались больше значений, установленных для открытых пахотных участков. Действительно, в пашнях рядом с лесополосами в почвы дополнительно привносятся растительные остатки, отсутствующие на открытых полях. Ими являются переносимый ветром опад листьев, а также отмирающая часть корневых систем деревьев, которые авторы статьи нередко обнаруживали в почвенных разрезах даже на удалении 12–15 м от края лесополос.



**Рис. 4.** Изменение во времени запасов углерода органического вещества при распашке автоморфных черноземов лесостепи, % от исходных запасов в целинных почвах (по усредненным характеристикам участков 1, 2, 3 (Ивнянский, Губкинский и Прохоровский р-ны Белгородской обл. соответственно)). Значения над стрелками соответствуют периоду распашки 95 лет. Условный знак 4 – запасы углерода органического вещества в 150-летних пашнях рядом с лесополосами (средние значения на участках Стрелецкая Степь, Ямская Степь, Каменная Степь).

В табл. 5 кроме расчетных характеристик, отражающих баланс С орг в почвах под лесополосами на российских ключевых участках, указаны балансовые значения органического углерода на участке Гурон США, на котором исходные значения запасов органического углерода были приняты равными запасам в целинных почвах. Таким образом, черноземы и моллисоли под искусственными лесонасаждениями обогащаются органическим веществом, и, следовательно, лесные мелиорации агроландшафтов способствуют изъятию из атмосферы углерода углекислого газа и переводу его в лесную фитомассу и в органическое вещество почв.

Согласно проведенным расчетам, за 55-летний период произрастания лесополос накопленные в метровой толще почв запасы органического углерода составили на участках: Ямская Степь – 80 т/га, Стрелецкая Степь – 72 т/га, Каменная Степь – 40 т/га. За 19 лет произрастания лесонасаждения на участке Гурон запасы углерода гумуса в метровой толще почв увеличились на 37 т/га по сравнению с уровнем, существовавшим до посадки леса (табл. 6). Средняя годовая скорость накопления запасов углерода органического вещества в слое 0–100 см почв под лесопосадками на российских участках исследования варьировала от

0.7 (Каменная Степь) до 1.5 (Ямская Степь) т/га, а на участке Гурон – 1.9 т/га. Выявленные диапазоны интенсивности накопления С орг почвами под полезавитными лесонасаждениями находятся в соответствии с представлениями ряда авторов и, в частности, Исаева с соавт. [6], согласно которым ежегодное депонирование углерода экосистемами защитных лесонасаждений после выхода их на стационарный режим функционирования оценивается в среднем величиной 1.9 т/га. Более интенсивные темпы прибавки запасов органического углерода, обнаруженные в почвах под молодыми лесонасаждениями (Гурон) по сравнению с более старыми лесополосами (ключевые участки в России), могут свидетельствовать о замедлении во времени гумусово-аккумулятивного процесса и в перспективе – о переходе к стадии деградации запасов гумуса в почвах под зрелыми древостоями. Например, исследованиями Соэра с соавт. [32] было доказано увеличение интенсивности поступления органического углерода гумуса в слой 0–30 см почв Айовы под искусственными лесонасаждениями до 30-летнего периода роста деревьев, а затем уменьшение интенсивности до 0 – к 50-летнему возрасту древостоев. Также хорошо известно, что в результате позднеголоценового наступления лесов на степи черноземы, оказавшиеся

**Таблица 6.** Запасы углерода органического вещества в почвах под лесополосами и на момент создания лесополос, т/га

Слой, см	Стрелецкая Степь			Ямская Степь			Каменная Степь			Гурон		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0–30	126.4	111.0	+15.4	142.1	121.4	+20.7	125.0	134.2	–9.2	68.3	46.2	+22.1
0–50	191.6	154.0	+37.6	229.3	183.2	+46.1	206.5	200.5	+6.0	88.3	66.7	+21.6
0–100	296.1	224.0	+72.1	369.0	288.8	+80.2	353.8	314.2	+39.6	122.5	85.9	+36.6

Примечание: 1 – запасы углерода органического вещества в почвах под лесополосами; 2 – запасы углерода органического вещества в почвах на момент создания лесополос (для участков Стрелецкая Степь, Ямская Степь, Каменная Степь – реконструкция в соответствии со схемами на рис. 4) 3 – разность между 1 и 2.

под лесами, эволюционировали в серые лесные почвы с меньшими запасами в них органического вещества [2, 20]. По-видимому, также не случайно, исследования Тумина в Каменной Степи, относящиеся к 1930 г., показали накопление органического вещества в почвах под недавно посаженными лесополосами [16], тогда как исследования, проведенные в Каменной Степи в конце XX—начале XXI вв. уже не выявили существенных различий между почвами под старыми лесополосами и на целине [11, 12]. Следовательно, вопрос изучения поведения органического углерода в почвах под лесонасаждениями должен быть обязательно сопряжен с исследованием разновозрастных древостоев. Вместе с тем, нашими исследованиями было показано все еще положительное воздействие на гумусовое состояние черноземов искусственных лесопосадок возраста 55 лет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экосистемы искусственных полезащитных лесонасаждений, возникших на месте луговых и лугово-степных ландшафтов в лесостепной зоне северных материков, являются аккумуляторами углерода, участвующими в формировании органического вещества почв под лесонасаждениями.

За 55 лет произрастания лесополос на черноземах европейской России средняя ежегодная скорость накопления в них запасов углерода органического вещества (слой 0–100 см) варьировала в пределах 0.7–1.5 т/га на участках Стрелецкая Степь, Ямская Степь, Каменная Степь. За 19-летний период произрастания искусственного лесонасаждения на участке Гурон США средняя ежегодная скорость накопления углерода органического вещества в метровой толще почвы (Моллисол (Mollisol), Гаплустолл (Haplustoll), почвенная серия Бонилла) составила 1.9 т/га.

Установлена линейная зависимость между изменением мощности гумусового профиля почв, формирующихся под искусственными лесопосадками (по сравнению с целинными почвами), и гидротермическим коэффициентом исследуемых регионов (северо-восток Великих равнин США, Среднерусская возвышенность России). Приращение мощности гумусово-аккумулятивной части профиля в почвах под лесопосадками на каждые 10 см происходит при увеличении величины ГТК на 0.15. В пространстве лесостепи центра Восточной Европы это соответствует продвижению в северо-западном направлении на расстояние 50–100 (в среднем 75) км.

Выявлена общая закономерность усиления гумусово-аккумулятивного процесса в осевых частях лесополос, что проявляется в пространственных трендах изменения запасов С орг в слое

0–30 см почв по направлению от пашен к центральным частям лесополос с увеличением показателя на 3.5–10 т/га на каждые 10 м.

Наблюдения за формированием искусственных полезащитных лесонасаждений и сопряженных с ними почв позволяет заключить, что данные участки являются антропогенно-природными ландшафтами, характеризующимися стадийностью развития, взаимосвязью формирующих их компонентов, индивидуальным комплексом свойств и процессов функционирования. В свете решения проблемы глобального потепления климата искусственные полезащитные лесонасаждения, изученные в Центральной лесостепи Восточной Европы и на северо-востоке Великих равнин США, в течение, по крайней мере, первых десятилетий своего функционирования следует признать активными агентами ассимиляции атмосферного углерода и перевода его в фитомассу и почвенное органическое вещество.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическое состояние черноземов ЦЧО / Под общ. ред. Щербакова А.П., Васенева И.И. Курск, 1996. 330 с.
2. Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
3. Альбенский А.В. Лесомелиорация и изменение природных условий // Вестник с.-х. наук. 1961. № 2. С. 96–101.
4. Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л. Эрозия и потери органического углерода почв при распашке склонов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2010. № 6. С. 32–38.
5. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения // Способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013. 352 с.
6. Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П. и др. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М., 1995. 155 с.
7. Каганов В.В. Изменение экосистемных запасов углерода при облесении в степной и полупустынной зонах европейской части России // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 7–12.
8. Когут Б.М., Титова Н.А., Булеева В.С. Антропогенная трансформация качественного состава гумуса черноземов Каменной Степи // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2009. № 64. С. 41–49.
9. Кретьинин В.М. Мониторинг плодородия почв лесоаграрного ландшафта лесостепи Среднерусской равнины // Вестник с.-х. наук. 1991. № 6. С. 45–49.
10. Лисецкий Ф.Н. Почвообразовательный потенциал лесных насаждений при облесении песков в условиях лесостепи и степи // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 13–20.

11. Мильков Ф.Н., Нестеров А.И., Петров П.Г., Скачков Б.И. и др. Каменная степь: лесоаграрные ландшафты. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1992. 224 с.
12. Приходько В.Е., Чевердин Ю.И., Титова Т.В. Изменение форм органического вещества черноземов Каменной Степи при разном использовании, местоположении и увеличении степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1494–1504.
13. Савин И.Ю., Чендев Ю.Г. Изменение во времени содержания гумуса в пахотных лесостепных почвах // Почвоведение. 1994. № 5. С. 88–92.
14. Соловьев П.Е. Влияние лесных насаждений на почвообразовательный процесс и плодородие степных почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. 200 с.
15. Сорокина Н.П. Факторы дифференциации и агрогенной трансформации // Каменная Степь: проблемы изучения почвенного покрова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. С. 97–120.
16. Тумин Г.М. Влияние лесных полос на почву в Каменной Степи. Воронеж: Коммуна, 1930. 40 с.
17. Хитров Н.Б., Лебедева И.И., Чевердин Ю.И., Чижикова Н.П., Ямнова И.А. Морфологические свойства почв Каменной Степи // Каменная Степь: проблемы изучения почвенного покрова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. С. 36–71.
18. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Распространение сезонно переувлажненных и затопленных почв в Каменной Степи (2006 г.) // Каменная Степь: проблемы изучения почвенного покрова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. С. 121–133.
19. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., Роговнева Л.В., Нацентов С.В. Особенности структуры почвенного покрова приводораздельного пологого склона в условиях современного сезонного переувлажнения // Разнообразие почв Каменной Степи. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2009. С. 116–144.
20. Чендев Ю.Г. Естественная и антропогенная эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. Дис. ... докт. геогр. н. М., 2005. 303 с.
21. Чендев Ю.Г., Александровский А.Л., Хохлова О.С., Смирнова Л.Г., Новых Л.Л., Долгих А.В. Антропогенная эволюция серых лесостепных почв южной части Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2011. № 1. С. 3–15.
22. Чендев Ю.Г., Хохлова О.С., Александровский А.Л. Дегумификация автоморфных черноземов агроландшафтов Центральной лесостепи: интенсивность и стадии // Мат-лы межд. науч. конф. “Современное состояние черноземов”, Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2013. С. 350–352.
23. Щеглов Д.И. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. М.: Наука, 1999. 214 с.
24. Brandle J.R., Hodges L., Zhou X.H. Windbreaks in North American agricultural systems // Agroforestry Systems. 2004. № 61. P. 65–78.
25. Chendev Yu.G., Burras C.L., Sauer T.J. Transformation of forest soils in Iowa (United States) under the impact of long-term agricultural development // Eurasian Soil Science. 2012. V. 45. № 4. P. 357–367.
26. Kort J. Benefits of windbreaks to field and forage crops // Agricultural Ecosystems and Environment. 1988. V. 22/23. P. 165–190.
27. Olson K.R., Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Markelov M.V., Golosov V.N., Lang J.M. Use of agnetic tracer and radio-caesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates // Catena. 2013. V. 104. P. 103–110.
28. Perry C.H., Woodall C.W., Liknes G.C., Schoeneberger M.M. Filling the gap: improving estimates of working tree resources in agricultural landscapes // Agroforestry Systems. 2009. V. 75. № 1. P. 91–101.
29. Read R.A. The Great Plains shelterbelt in 1954 (A re-evaluation of field windbreaks planted between 1935 and 1942 and a suggested research program). Great Plains Agricultural Council Publication. Nebraska Agricultural Experiment Station, Lincoln, NE. 1958. № 16. 125 p.
30. Sauer T.J., Cambardella C.A., Brandle R.B. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt // Agroforestry Systems. 2007. V. 71. P. 163–174.
31. Sauer T.J., Nelson M.P. Science, ethics, and the historical roots of our ecological crisis: was white right? // Sustaining soil productivity in response to global climate change: science, policy, and ethics. Chichester, UK: Wiley-Blackwell. 2011. P. 3–16.
32. Sauer T.J., James D.E., Cambardella C.A., Hernandez-Ramirez G. Soil properties following restoration or afforestation of marginal cropland // Plant and Soil. 2012. V. 360. № 1–2.
33. U.S. Forest Service. Possibilities of shelterbelt planting in the Plains region. Lake States Forest Experiment Station Special Publication. 1935. 201 p.